

К. П. Сиднов^{1,3*}, Д. О. Московских², А. С. Рогачев^{2,3}

¹Лаборатория моделирования и разработки новых материалов, НИТУ «МИСиС», г. Москва

²Научно-исследовательский центр «Конструкционные керамические наноматериалы», НИТУ «МИСиС», г. Москва

³Институт структурной макрокинетики РАН, г. Черноголовка

**sidnov@list.ru*,

Научный руководитель – проф., д-р физ.-мат. наук А. С. Рогачев

САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ Ni_2AlTi

Тройные соединения на основе никеля – алюминия обладают уникальным сочетанием таких свойств, как низкая плотность, высокая температура плавления, устойчивость к коррозии и окислению, а также температурная стойкость. Благодаря таким свойствам эти материалы являются отличными кандидатами для различных применений, например, для применения в авиастроении. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) – это энергосберегающая технология, с помощью которой в данной работе было получено соединение Ni_2AlTi .

Ключевые слова: СВС, синтез, тройные соединения никель алюминия, ИПС, горячее прессование.

K. P. Sidnov, D. O. Moskovskikh, A. S. Rogachev

SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS OF Ni_2AlTi

The intermetallic nickel aluminide based ternary compounds have several exciting features, including low-density, high melting point, excellent corrosion and oxidation resistances and high strength at increased temperature. For these reasons, this intermetallic is good candidate for diversity of application as elements for airframe and turbines. Self-propagating high-temperature synthesis (SHS), also known as combustion synthesis (CS), is an energy saving technology to fabricate NiAl-based alloys.

Keywords: SHS, combustion synthesis, nickel aluminide ternary compound, SPS, hot pressing.

Интерметаллическое соединение NiAl обладает несколькими особенностями, в том числе низкой плотностью, относительно высокой температурой плавления, отличной стойкостью к коррозии и окислению, высокой прочностью при повышенной температуре и относительно низкой стоимостью [1]. По этим причинам интерметаллиды на основе NiAl являются хорошими кандидатами для разнообразных применений,

например для производства лопаток и других элементов турбин [2]. Однако эти соединения обладают низкой пластичностью и проявляют склонность к хрупкому разрушению, особенно в поликристаллической форме, что ограничивает их применение [3]. Решить указанную проблему можно применением тройных соединений на основе NiAl, где в качестве легирующих элементов используются В, С, Ti, Zr, Nb и Ta [4].

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) – это метод получения неорганических соединений с помощью экзотермических химических реакций, как правило, с участием солей или чистых металлов [5]. Возможность самораспространяющегося высокотемпературного синтеза интерметаллидов на основе NiAl объясняется тем, что реакция между Al и Ni является экзотермической, с адиабатической температурой горения порядка 1911 К [6]. Это означает, что нагрев локального объема смеси (около 1 мм³) до некоторой температуры инициирования реакции ведет к тому, что реакция распространяется по образцу только за счет выделяющейся теплоты, образуя желаемое интерметаллическое соединение.

В данной работе были применены следующие методы, включающие СВС:

СВС в атмосфере аргона (инициирование реакции осуществлялось при помощи поджигающей вольфрамовой спирали) (рис. 1);

СВС механически активированной смеси;

искровое плазменное спекание механически активированной смеси (рис. 2);

горячее прессование синтезированного материала.

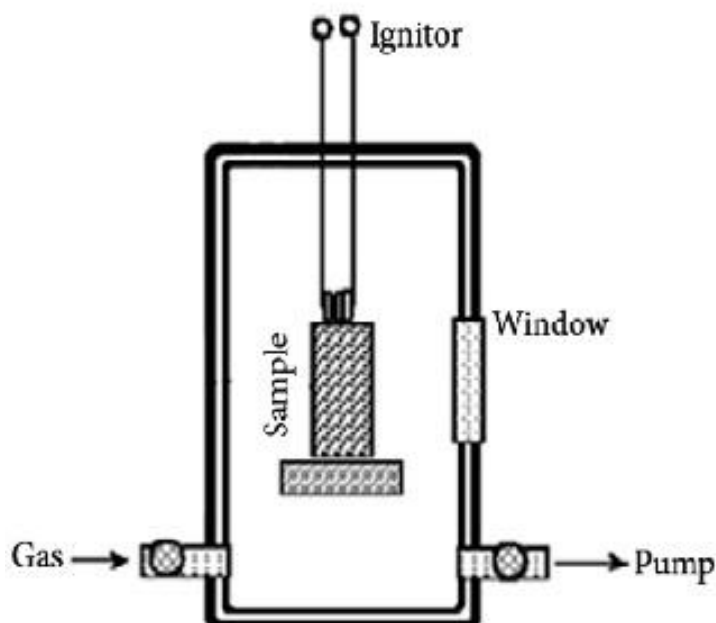


Рис. 1. Схематичное изображение СВС-реактора

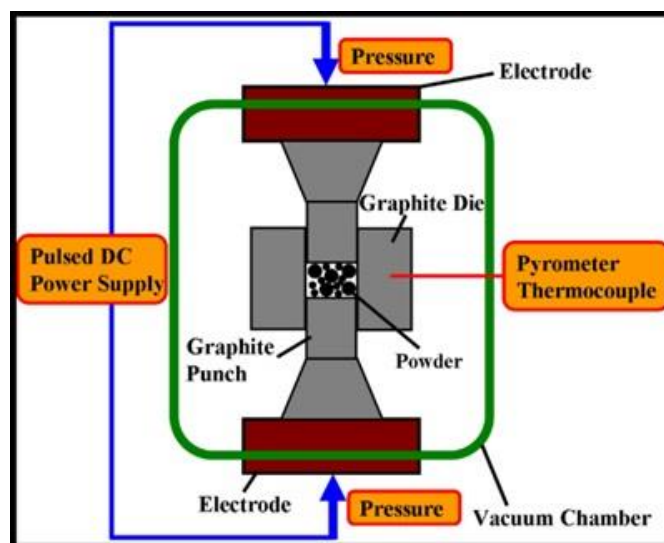


Рис. 2. Схематичное изображение установки искрового плазменного спекания

Стоит отметить, что для механической обработки смесей в работе использовалась планетарная шаровая вращающаяся мельница «Активатор 2S» («Активатор», Новосибирск), спекание проводилось на установке *LABOX Model-650*, фазовый состав приготовленных образцов был исследован с помощью установки дифракционного анализа «ДРОН-3М».

Для синтеза соединения Ni_2AlTi в работе были использованы следующие исходные материалы: алюминий (АСД-1); никель (ПНЭ-1); титан (ПТС-1). Эти порошки смешивались для приготовления гетерогенных смесей требуемого состава:

Соединение Ni_2AlTi	Ni	61,1 %
	Al	24,9 %
	Ti	14,0 %

На предварительном этапе исследований, используя цилиндрические образцы, спрессованные из исходной смеси (диаметр 15 мм; высота 5 мм) до плотности $3,4 \text{ г/см}^3$, с помощью СВС в реакторе, удалось получить однофазные образцы (рис. 3). Однако полученные образцы имели очень низкую плотность (порядка 35–50 %).

Порошок синтезированного в реакторе материала использовали для уплотнения образцов методом горячего прессования. При исследовании применения метода горячего прессования (ГП) было установлено, что при температуре 1350°C начинается плавление фазы Ni_2AlTi .

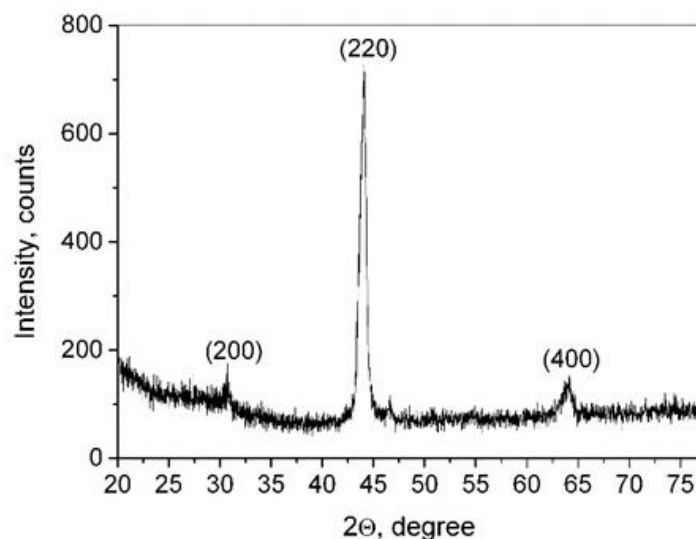


Рис. 3. Рентгенограмма продукта СВС синтеза

В результате были оптимизированы параметры получения образцов с относительной плотностью 95 %. Эти параметры представлены ниже:

Температура, °С.....1300
 Давление, МПа40
 Выдержка, мин10
 Скорость нагрева, °С/мин100

Таким образом, было показано, что сочетание метода СВС и ГП позволяет получить консолидированный материал, пригодный для дальнейшего использования.

Следующим этапом исследования синтеза Ni_2AlTi стало искровое плазменное спекание предварительно механически активированной смеси. Для этого нами была применена высокоэнергетическая механическая обработка в планетарной мельнице (694 об/мин) в течение 2 минут с соотношением масс мелющих тел (стальные шары, $D = 5$ мм) к массе обрабатываемой смеси 40:1. Механическая активация обеспечивает увеличение площади межчастичного контакта, а также увеличивает площадь реагирующей поверхности, что важно ввиду того, что реакция лимитируется поверхностной диффузией реагентов. Температура спекания составила 800 °С, время выдержки 10 мин, а усилие прессования 40 МПа.

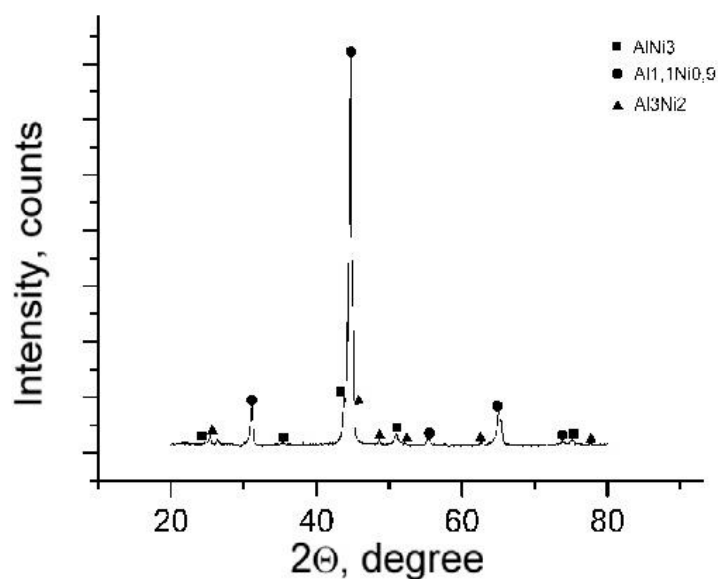


Рис. 4. Рентгенограмма образца, полученного с помощью искрового плазменного спекания

Фазовый анализ синтезированного материала (рис. 4) позволяет предположить, что при указанных параметрах спекания полученные образцы состоят из промежуточных продуктов синтеза. Проведенные эксперименты дают представление о двухстадийном механизме образования тройной фазы при СВС. На первой стадии образуются соединения Ni и Al, и только после этого становится возможным образование фазы Ni_2AlTi .

ЛИТЕРАТУРА

1. Miracle D. B., Darolia R. NiAl and its Alloys // *Intermetallic Compounds*. 1995. Vol. 2. P. 55–74.
2. Darola R. NiAl Alloys for High-Temperature Structural Applications // *JOM*. 1991. № 43(3). P. 44–49.
3. Bose A., Rabin B. H., German R. M. Reactive sintering nickel-aluminide to near full density // *Powder Metall, Int.* 1988. Vol. 20. P. 25.
4. Baker I., Munroe P. R. Reactive Sintering of Nickel-Aluminide to Near Full Density / *J. Met.* 1988. № 40. P. 28.
5. Merzhanov A. G., Borovinskaya I. P. Self-propagated high-temperature synthesis of refractory inorganic compounds // *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1972. Vol. 204, № 2. P. 366–369.
6. Varma A., Mukasyan A. S. Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Materials // *Combustion Synthesis of Intermetallic Compounds*, N. Y. : Taylor & Francis. 2002. P. 1–34.